

## استعمال كواشف الأثر النووي CR-39 لتحقق من فقد الطاقة الخطي لجسيمات ألفا

د. رياض شويكاني\*

د. بیداء الأشقر\*

### الملخص

جرى في هذا العمل دراسة تفاعل جسيمات ألفا مع كواشف الأثر النووي (كواشف الـ CR-39)، ودراسة تغيير أقطار آثار جسيمات ألفا المسجلة على الكواشف بتغيير المسافة بينها وبين المصدر، وأظهر النتائج توافق هذا التغيير مع شكل منحنى براغ (Bragg Curve)، وجرى ثبت العلاقة الوثيقة بين قطر الأثر والطاقة المودعة عبر القيمة الثابتة لقطر الآثار المسجلة على الكواشف منسوبة إلى الطاقة المودعة المحسوبة ابتداءً من علاقة بيث بدلالة المسافة بين الكاشف والمصدر؛ مما يؤكد إمكانية استخدام الكواشف البلاستيكية CR-39 كمطيافية لجسيمات ألفا. كما تبين أن مردود الكشف أي استجابة كواشف الـ CR-39 من أجل طاقات مختلفة لجسيمات ألفا ثابت.

**الكلمات المفتاحية:** انتقال الطاقة الخطي، جسيمات ألفا، قمة براغ، كواشف الأثر النووي.

\* جامعة دمشق، كلية العلوم، قسم الفيزياء.

\* هيئة الطاقة الذرية السورية، قسم الوقاية والأمان، دمشق، ص.ب. 6091.

## Linear Energy Transfer of Alpha particles in different gaseous media using the Nuclear Track Detectors CR39

B. achkar\*

R. Shweikani\*

### Abstract

In this work, the interaction of alpha particles with nuclear track detectors (CR-39 detectors) was studied. The peak of Bragg was verified by the notice of the variation of the Alpha tracks diameters, according to the change in the detector-source distance, recorded by these detectors. The experiences show that the diameter of the track was related with the theoretical linear energy transfer which confirms the occurrence of the Bragg peak when Alpha particles interact with the detector. A vacuum chamber was fabricated to study the interaction of alpha particles with several types of gas, distances, and vacuum rate, and to verify the Bragg-Kliman rule for gases which have an atomic weight close to that for air.

**Keywords:** Linear energy transfer, Alpha particles, Bragg peak, Nuclear track detectors, Bragg-Kliman rule.

---

\*Damascus University, Faculty of Science, Physics Department.

\*Atomic Energy Commission of Syria, Damascus, P.O. Box 6091

**1. مقدمة:**

يعتمد فهم طبيعة الإشعاعات النووية على تفاعلها مع المادة. وتعد هذه المعرفة ضرورية في مجالات عدة من العلوم النووية، مثل: تصميم الكواشف النووية واستخدامها، وأجهزة القياس، وإنشاء الدروع الإشعاعية، والتطبيقات المتنوعة للإشعاع في العلوم والطب والصناعة والزراعة وغيرها... [2]

تؤدي التفاعلات التي تحدث للإشعاع النووي مع المادة عموماً إلى انتقال جزئي أو كلي لطاقة الإشعاع إلى المادة الهدف؛ مما يسبب في بعض الأحيان تأيين ذرات المادة يجعلها تفقد عدداً من إلكتروناتها المدارية، وتركها على شكل أيون موجب الشحنة، أو في أحيان أخرى إثارة هذه الذرات برفع بعض إلكتروناتها إلى مدارات أعلى.

**2. تفاعل جسيمات ألفا مع المادة:**

إذا أهملنا التفاعلات النووية التي يمكن أن تحرّضها جسيمات ألفا في مجال الطاقات العالية جداً (GeV)، تبقى فقط التأثيرات المتبادلة الكهروستاتيكية بين هذه الجسيمات المشحونة، ومكونات المادة، وهنا نذكر أهم هذه التفاعلات:

التفاعلات غير المرنة مع الإلكترونات الذرية: وتعدّ هذه الآلية العملية الرئيسية المسؤولة عن نقل الطاقة من جسيم ألفا إلى المادة، وبشكل خاص عندما لا تسمح طاقة الجسيم بحدوث ظاهرة إشعاع الكبح. في مثل هذه التصادمات ينتقل جزء من طاقة جسيمات ألفا للإلكترونات بحيث تجعلها قادرة على الانفلات من مدارها وترك الذرة بحالة تأين، ويتكون في كل من هذه الحالات زوج أيوني هو عبارة عن الإلكترون المنفلت من المدار والذرة المؤينة؛ فضلاً عن طاقة الإلكترون المنفلت والتي قد تكون كافية للتفاعل مع إلكترون آخر، وإخراجه من مداره أيضاً [5].

التفاعلات غير المرنة مع النواة الذرية: يمكن في هذه التفاعلات أن تصبح النواة في حالة إثارة، ويمكن لجسيم ألفا الوارد أن يتفاعل كهروستاتياً مع الحقل الكهربائي للنواة الذرية، وأن يفقد طاقته نتيجة لذلك بإصدار فوتونات على حساب طاقته الحركية [2]. يُطلق على هذا النوع من الفقد الطاقوي اسم إشعاع الكبح.

التفاعلات المرنة مع النواة الذرية: تسمى هذه التفاعلات تبعثر رذرفورد، وفيها يفقد جسيم ألفا المشحون جزءاً من طاقته الحركية التي تظهر على شكل ارتداد للنواة الذرية، ولا يحدث هنا إثارة للنواة، ولا يصدر الجسيم إشعاعاً، كما في حالة التصادمات غير المرنة.

التفاعلات المرنة مع الإلكترونات المدارية: في هذه التصادمات ينحرف جسيم ألفا الوارد عن مساره بشكل طفيف، مع خسارة صغيرة في طاقته الحركية. لا يؤدي الإشعاع دوراً مهماً في الخسارة الطاقية للجسيمات المشحونة الثقيلة كالجسيم ألفا، إلا عندما يمتلك جسيم ألفا طاقةً حركيةً من مرتبة أو أكبر من طاقته السكونية ( $\approx 10^3 \text{ MeV}$ ). لهذا السبب تبقى التفاعلات غير المرنة مع إلكترونات المادة الآلية الأساسية المسؤولة عن الفقد الطاقى لجسيمات ألفا للمصادر الطبيعية. ويسبب الشحنة العالية التي تحملها جسيمات ألفا، يتميّز مسارها بالكثافة العالية من الذرات المتأينة، ويكون انتقال الطاقة كبيراً جداً في المليمتر الواحد؛ لذا تمتاز بصغر طول مسارها الذي يكون في حدود الميكرومتر داخل المادة؛ ولقدرتها الكبيرة على تأيين ذرات المادة [5].

### 3. قدرة الإيقاف الخطية - علاقة بيت - المدى:

تعبّر قدرة الإيقاف الخطية والتي يرمز لها بالرمز  $S$  عن مقدار خسارة الجسيم لطاقته  $dE$  على طول مساره  $dx$  في المادة، أو بمعنى آخر قدرة المادة على إيقاف هذه الجسيمات، حيث يمكن كتابتها على النحو الرياضي الآتي [5]:

$$S = -\frac{dE}{dx} \dots \dots \dots (1)$$

وتعبّر الإشارة السالبة في المعادلة على أن هناك تناقصاً (خسارة) في طاقة الجسيم كلما عبر مسافة  $dx$  في المادة. باستخدام ميكانيك الكم النسبوي وتقريب بورن، استطاع العالم بيت اشتقاق علاقة رياضية لقدرة الإيقاف للجسيمات المشحونة الثقيلة، وعرفت باسم علاقة بيت لقدرة الإيقاف، وهي كما يلي [5]:

$$S = \left| \frac{dE}{dx} \right| = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e v^2} NZ \left[ Ln \frac{2m_e v^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right] \dots, \beta = \frac{v}{C} \dots \dots (2)$$

حيث  $v$ : سرعة الجسيم المشحون الوارد.  $z$ : عدد شحنات الجسيم الوارد.  $e$ : شحنة الإلكترون.  $N$ : عدد الذرات في وحدة الحجم للمادة.  $m_e$ : الكتلة السكونية للإلكترون.  $Z$ : العدد الذري لوسط المادة.  $I$ : طاقة الإثارة الوسطية للإلكترونات المادة.

وبالتالي يتضح لنا أنّ قدرة الإيقاف الخطية تتناسب طردياً مع مربع شحنة الجسيم الوارد، وعكساً مع مربع سرعته، أما بالنسبة للمادة فإنها تعتمد على عدد الإلكترونات في المادة وعلى متوسط طاقة الإثارة لها [11].

وتجريبيّاً، يُقاس فقد الطاقة الخطّي بالتصادمات عبر عدد الأزواج الأيونية التي يولدها الجسيم المشحون على طول مساره في المادة. فإذا اعتبرنا أنّ جسيم ألفا، مثلاً، يفقد وسطياً كمية من الطاقة تساوي  $W$ ، لتوليد زوج أيوني: إلكترون - أيون موجب، في مادة ما، يكون عدد الأزواج الأيونية المتولدة في وحدة الطول من مساره، أو ما يُطلق عليه اسم كثافة التأين أو التأين النوعي مساوياً:

$$\frac{d n}{d x} = \frac{1}{W} \left| \frac{dE}{dx} \right| \dots\dots (3)$$

تتعلّق الكمية  $W$  بالعمليات المعقّدة مثل إثارة الذرات، والتأين الأولي الذي يسببه الجسيم الوارد وكذلك التأينات الثانوية التي يمكن أن تسببها الإلكترونات السريعة الناتجة عن عمليات التأين الأولي لذرات الوسط. إلا أنّ هذا المقدار، من أجل وسطٍ محدّد لا يرتبط بتقريبٍ أولي بنوع الجسيم الوارد ولا بطاقته الحركية. مثلاً تأخذ  $W$  في الهواء القيم 35.0، 35.2، و 33.3 eV، من أجل إلكترونات بطاقة حركية أولية 5 keV، جسيمات ألفا بطاقة حركية أولية 5.3 MeV، وبروتونات بطاقة حركية أولية 340 MeV، على التوالي.

عندما يدخل جسيم ألفا وسطاً ماصّاً، يبدأ بالتفاعل مع العديد من إلكتروناته؛ معطياً إيّاها جزءاً من طاقته من دون انحرافٍ كبير عن اتجاه وروده الأصلي؛ أي إنّ الكتلة الكبيرة لجسيم ألفا تجعله يسلك مساراً شبه مستقيم في الوسط الماص، إلى أن يصل إلى نهاية مساره حيث يتركز معظم الفقد الطاقّي للجسيم، ويبتعد عن مساره المستقيم. يمكن في هذه الحالة تقدير مدى جسيم ألفا في الوسط الماص؛ أي المسافة التي يقطعها قبل أن يخسر كامل طاقته الحركية ابتداءً من علاقة بيت، بحساب التكامل:

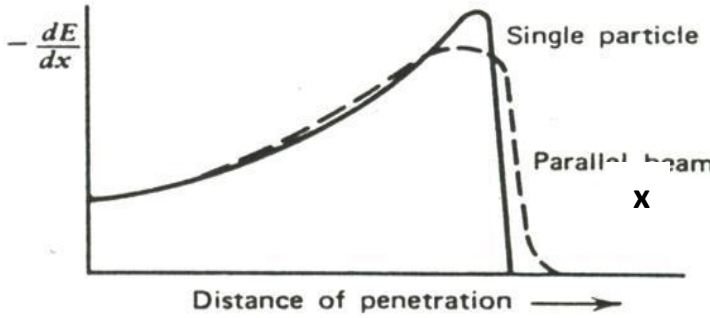
$$R = \int_0^{x_{\max}} dx = \int_{E_0}^0 \left( \frac{dx}{dE} \right) \cdot dE = \int_{E_0}^0 \left( - \frac{dE}{dx} \right)^{-1} \cdot dE \dots\dots (4)$$

حيث  $E_0$  الطاقة الحركية الابتدائية للجسيم المشحون.

## 4. منحنى براغ:

كما هو معروف تبدأ جسيمات ألفا بفقد طاقتها تدريجياً من بداية اختراقها للمادة حيث يؤدي ذلك إلى تأين ذرات المادة وهذا الفقدان يؤدي إلى انخفاض سرعة هذه الجسيمات، الشيء الذي يزيد الزمن الذي تقضيه بالقرب من ذرات المادة؛ وبالتالي يزيد من احتمال حدوث التفاعل بينها وبين ذرات المادة وهكذا حتى فقد كامل طاقتها وتوقفها والنقاطها للإلكترونات من ذرات المادة لتصبح ذرة هيليوم متعادلة كهربائياً. ويمكن لجسيم ألفا بطاقة (5-7) ميغا إلكترون فولت تكوين أزواج أيونية تصل إلى (50-80) ألف زوج أيوني لكل (اسم) في نهاية مسارها. وعرفت هذه الخاصية بنهاية منحنى براغ (وهو المنحنى الذي يعبر عن قدرة الإيقاف الخطية بدلالة مسافة الاختراق في المادة). أي يتميز هذا المنحنى بظهور قيمة عظيمة لقدرة الإيقاف الخطية ( $-dE/dx$ )؛ وبالتالي للتأين النوعي ( $dn/dx$ )، في نهاية المنحنى نتيجة لزيادة تركيز التأين في نهاية المسار.

وقمة براغ موضحة في الشكل (1)[5].



الشكل (1) منحنى براغ، وفي نهايته تظهر قمة براغ

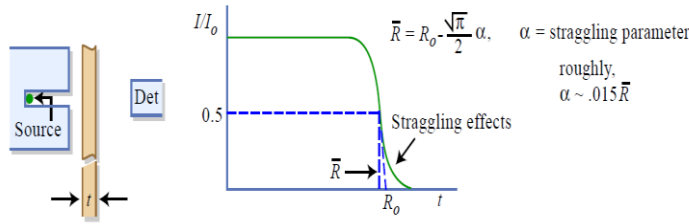
وجدت هذه الخاصية طريقها إلى التطبيقات الطبية حيث تستعمل حالياً لمعالجة الأورام السرطانية بواسطة البروتونات، ولكن على نطاق محدود حيث نختار طاقة الجسيمات المشحونة (البروتونات) بحيث تقع قمة التأين على المنطقة المراد القضاء على الخلايا السرطانية فيها. والبروتونات تستعمل عوضاً عن جسيمات ألفا؛ لأن مداها في النسيج الحي أكبر من مدى جسيمات ألفا؛ وبالتالي يمكن بواسطة

البروتونات الوصول إلى الخلايا التي تقع على أعماق أكبر، والتي يكون من الصعب أن تصله جسيمات ألفا لمحدودية مداها، حيث يمكن أن تتوقف في طبقة الجلد الخارجية، ولا تصل إلى الأنسجة العميقة [5].

جرى التمييز في الشكل (1) بين منحني براغ من أجل جسيم واحد، ومنحني براغ الوسطي من أجل عدد كبير من الجسيمات المشحونة. يتضمّن هذا الأخير آثار التباين (straggling effects)، الناتجة عن التوزع الإحصائي لقيم مدى الجسيمات المشحونة المختلفة والتي تمتلك السرعة الابتدائية نفسها في أثناء عبورها الوسط الماص، يتضح هذا الأثر عبر الذيل الممتد للمنحني في نهايته.

يوضّح الشكل (2) الترتيب التجريبي المستخدم عادةً لتحديد مدى الجسيمات المشحونة في مادة ما، حيث يوضع مصدر إشعاعي لجسيمات ألفا، ويوضع أمامه سماكات متزايدة من المادة المراد دراستها، كما مبين بالشكل، ويوضع في الطرف الآخر كاشف إشعاعي؛ لتسجيل عدد هذه الجسيمات  $I$ . إنّ جميع جسيمات ألفا التي تمتلك الطاقة الحركية الأولية نفسها، لها تقريباً المدى نفسه، وكلمة تقريباً هنا تعني أنّ هناك مدى متوسطاً لهذه الجسيمات، وقد يزيد أو ينقص بمقدار ضئيل جداً؛ نتيجة الانتشار غير المنتظم لهذه الجسيمات. وعدم الانتظام هذا يكون إحصائياً يخضع للتوزيع الطبيعي عند قياس مدى هذه الجسيمات، كما موضح بالشكل (2).

يُعرّف المدى الوسطي التجريبي  $\bar{R}$  بأنه السماكة من الوسط الماص التي تنخفض من أجلها الشدة الإشعاعية إلى نصف قيمتها الأولية. أمّا المدى الاستقرائي  $R_0$ ، فنحصل عليه بإجراء استقراء خطّي عند نقطة الانعطاف على منحني النفاذية الإشعاعية  $I/I_0$ . يُقاس مدى جسيمات ألفا في الهواء عادةً بالسنتيمتر.



الشكل (2) مدى جسيمات ألفا بعد اختراقها الحاجز .

قد يستعمل مدى جسيمات ألفا في الهواء أيضاً لمعرفة مداها النسبي في المواد الأخرى باستخدام قاعدة براغ - كليمان [2]:

$$\frac{R_1}{R_0} = \frac{\rho_0}{\rho_1} \times \frac{\sqrt{A_1}}{\sqrt{A_0}} \dots\dots\dots(5)$$

حيث: R هو المدى،  $\rho$  هي الكتلة الحجمية للوسط و A هو الوزن الذري للمادة البسيطة أو الوزن الجزيئي للمادة المركبة.

### 5. الانتقال الخطي للطاقة:

يُعرّف مصطلح الانتقال الخطي للطاقة (LET) على أنه فقد الطاقة في واحدة الطول، ويستخدم لتوصيف معدل انتقال الطاقة لكل وحدة مسافة على طول المسار. إن قدرة الإيقاف الخطية والانتقال الخطي للطاقة متشابهان. ولكن في حالة دراسة التأثير الإشعاعي من خلال هذا المصطلح يتم التمييز ما بين انتقال الطاقة من الجسيمات المشحونة والطاقة الممتصة فعلياً في الوسط. وقد عرّفت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية هذا المصطلح على أساس أنه متوسط الطاقة المودعة في المادة خلال مرورها مسافة معينة ضمن المادة [5]:

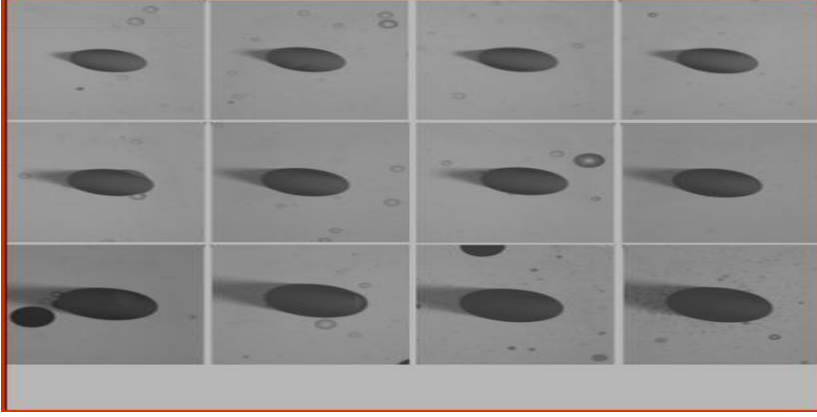
$$LET = - \left( \frac{dE}{dx} \right)_\Delta \dots\dots\dots(6)$$



وهنا نستطيع القول إن هذا المصطلح يصف عملية انتقال الطاقة في مسافة معينة من المادة من خلال التصادمات فقط على ألا تزيد على قيمة محددة هي  $\Delta$  بينما قدرة الإيقاف تعني قدرة المادة على امتصاص طاقة الجسيم؛ أي خسارة الجسيم لطاقته في المادة أينما كان في المادة ومن دون تحديد؛ أي إن قيمة  $\Delta$  هنا غير محددة (أو تساوي إلى ما لا نهاية). فعندما نقول: جسيم ذو طاقة انتقالية خطية عالية، فإننا نعني أن هذا الجسم قد منح المادة طاقة كبيرة في مسافة صغيرة، ومحددة. وعكس ذلك فإنه يتم منح طاقة قليلة في مسافة أكبر؛ لذا فإن الأنواع المختلفة من الإشعاع لها طاقة انتقال خطية يختلف بعضها عن بعض حسب قدرة هذا الإشعاع على تأيين ذرات المادة، ومنحها من طاقته [5].

## 6. كواشف الأثر النووي:

يعتمد هذا النوع من الكواشف على الأثر الذي تحدثه الجسيمات المؤينة في الأجسام العازلة بما فيها الزجاج والبلاستيك (مرجع (2)). حيث تحدث هذه الجسيمات آثاراً صغيرة لا يمكن رؤيتها إلا بالميكروسكوب الإلكتروني، حيث يكون قطر الأثر أقل من  $10^{-8}$  cm. ولكن يمكن جعل هذه الآثار مرئية بواسطة الميكروسكوب الضوئي العادي (أي قطر الأثر من مرتبة  $10^{-4}$  cm) بعملية الحك الكيميائي. تؤدي شروط الحك من حيث تركيز المحلول، ودرجة حرارته، وزمن الحك دوراً كبيراً في عملية الإظهار، كما وتعتمد أيضاً على نوع الكاشف المستخدم للكشف عن الآثار (بلاستيك، زجاج، بلورات، ... الخ) (مرجع (2 و 3)). فمن أجل الكواشف البلاستيكية يغمس عادة الكاشف في محلول كيميائي قلوي من هيدروكسيد الصوديوم أو هيدروكسيد البوتاسيوم بتركيز، ودرجة حرارة، وفترة زمنية محددة تعتمد على نوع الكاشف والجسيم المكتشف والتطبيق المستعمل. يقوم هذا المحلول بحك سطح الكاشف كاملاً بسرعة تسمى بمعدل الحك السطحي  $V_B$ ، بينما يكون حك مكان الأثر بسرعة أكبر تسمى سرعة حك الأثر  $V_T$ . وهذا يجعل هذه الآثار على شكل حفر تبين آثار الجسيمات المؤينة الساقطة في هذا الكاشف، كما موضح في الشكل (3) (مرجع (3)).



الشكل (3) تظهر آثار الجسيمات المؤينة على شكل حفر في الكاشف.

وتختلف أبعاد هذه الحفر باختلاف الجسيم الساقط وطاقته، وشروط الحرك المستعملة، الشيء الذي يجعل استعمال مثل هذه الكواشف في عملية المطيافية للتمييز بين الجسيمات الساقطة أمراً ممكناً (مرجع (3)).

#### 7. خطوات العمل:

استعمل في هذا العمل الكواشف البلاستيكية من النوع CR-39 حيث قطعت ورمزت وقسمت إلى ست مجموعات تألفت كل مجموعة من تسعة كواشف. شعيرة كواشف كل مجموعة على مسافات مختلفة وهي: 0.5، 1، 1.5، 2، 2.5، 3، 3.5، 4 cm باستخدام مصدر لجسيمات ألفا دائري الشكل نصف قطره 1.5 cm من الأمريشيوم  $Am^{241}$  نشاطه 19700Bq (مرجع (1 و 4)). وجرت عملية التشعيع باستعمال خلية (كانبيرا) ذات تدرجات من 0 حتى 5cm لتحديد مسافة التشعيع. كما هو مبين في الشكل (4). ثم جرى حكها عند درجة حرارة 70 درجة مئوية في محلول قلوي من الصوديوم هيدروكسيد (NaOH) بتركيز 6.25N وذلك لأزمنة مختلفة، وهي: 1 - 2 - 4 - 6 - 8 - 16 ساعة. جرى بعد ذلك قياس أقطار الآثار المتشكلة على الكواشف بواسطة مجهر ضوئي عند تكبير مناسب. ثم رسم المنحني الذي يوضح العلاقة بين البعد عن المصدر (المسافة) وقطر الآثار.



الشكل (4) خلية (كانبيرا) ذات تدريجات من 0 حتى 5 cm لتحديد مسافة التشعيع.

يبين الشكل (5) الحمام المائي المستعمل. استعمال مجهر ضوئي بتكبير مناسب من أجل عد الآثار المسجلة على الكواشف، وتحديد أقطارها.

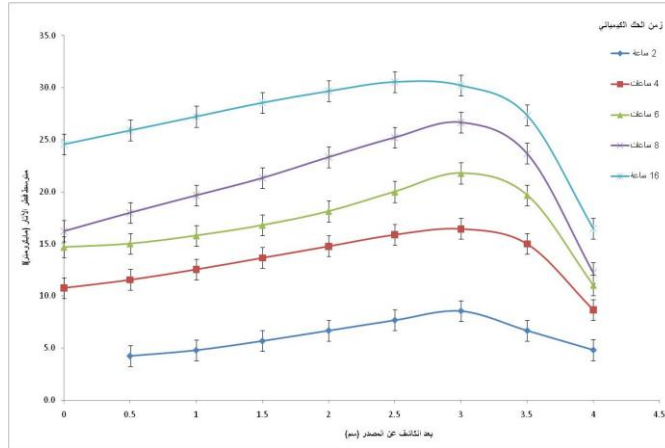


## 8. النتائج والمناقشة:

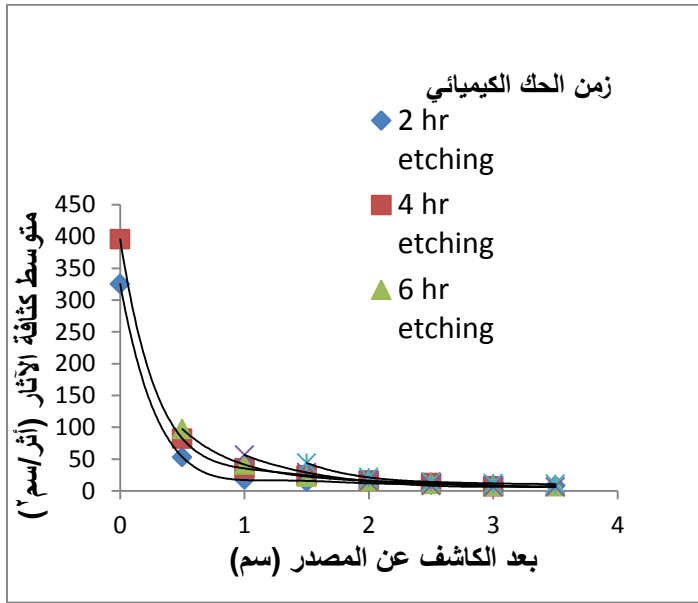
يبين الشكل (6) تغيّر قطر الأثر مع زيادة البعد بين المصدر وكاشف CR-39، وذلك من أجل أزمنة حرك مختلفة. يمكن القول: إنّ قطر الأثر يتزايد كلما ازداد بعد المصدر عن الكاشف حتى يبلغ أكبر قيمة عند المسافة 3 cm، ثم يصغر قطر الأثر بشكل كبير. وهذا يتوافق لحد كبير مع منحنى براغ الذي يبيّن أن إيداع الطاقة يزداد كلما انخفضت طاقة جسيم ألفا، أي مع ازدياد تغلغله في المادة.

يعلّل انقطاع المنحني بعد مسافة 4 cm بين المصدر والكاشف بعدم قدرة جسيمات ألفا على الوصول إلى الكاشف؛ إذ يفقد الجسيم كامل طاقته قبل وصوله؛ بسبب وجود الهواء، وهذا ما يمكن أن يؤكده الشكل (7) حيث لم يتم حساب تركيز الآثار بعد هذه المسافة. كما أنه يمكن الملاحظة من الشكل نفسه أنّ تركيز الآثار كان عالياً جداً في الكواشف التي كانت قريبة من المصدر والتي جرى حركها بزمن كبير؛ مما جعل الآثار يتراكب بعضها فوق بعض؛ الأمر الذي أدى إلى عدم إمكانية عدّ هذه الآثار.

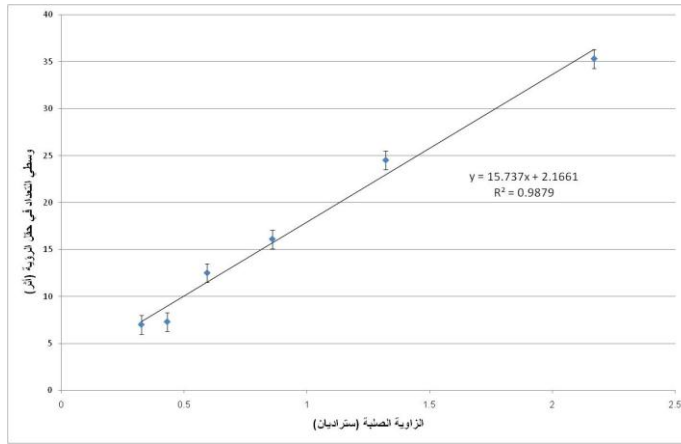
يتضح من الشكل (7) أنّ تركيز الآثار يتناقص مع زيادة المسافة الفاصلة بين المصدر والكاشف حتى بعد 2 cm، ويُفسّر هذا بتغيّر الزاوية الصلبة التي ترد ضمنها جسيمات ألفا إلى الكاشف. يبيّن الشكل (8) تغيّر العد في حقل الرؤية الواحد بدلالة تغيّر الزاوية الصلبة، ويظهر فيه العلاقة الخطية بين القيمتين.



الشكل (6) تغيّر قطر الأثر مع زيادة البعد بين المصدر وكاشف CR-39، وذلك من أجل أزمنة حرك مختلفة.



الشكل (7) تركيز الآثار بدلالة بعد الكاشف من أجل أزمنة حك مختلفة.



الشكل (8) العلاقة بين وسطى عدد الآثار في حقل الرؤية الواحد بدلالة الزاوية الصلبة (تتغير مع المسافة).

حيث من المعروف أن تعداد الكاشف يعطى؛ وفق المعادلة: [15]

$$N = \frac{S \cdot t \cdot \Omega \cdot \varepsilon}{4 \cdot \pi} \dots\dots(7)$$

حيث: S نشاط المصدر المشع، و t زمن التشعيع،  $\varepsilon$  المرود النسبي للكاشف و  $\Omega$  الزاوية الصلبة التي ترى فيها الأشعة الكاشف.

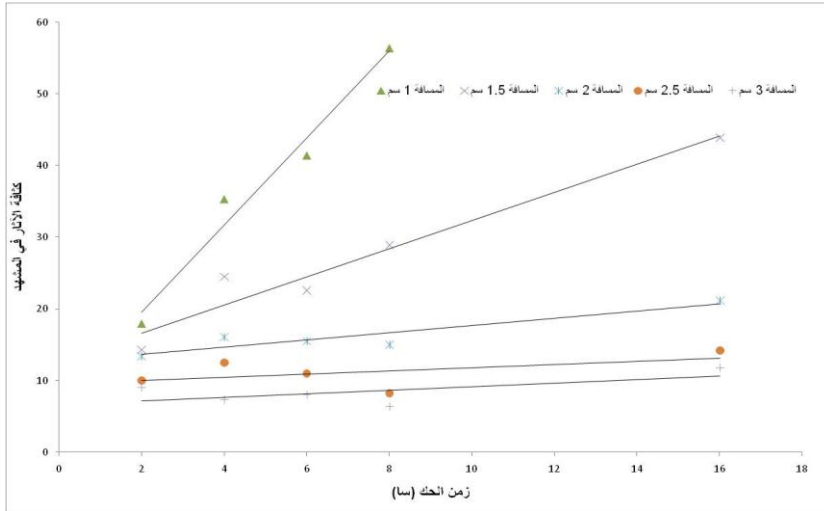
وقد حسبت الزاوية الصلبة باستعمال المعادلة الآتية [15-16]:

$$\Omega = 2\pi \left[ 1 - \frac{h}{\sqrt{(h^2 + R^2)}} \right] \times F \dots\dots(8)$$

حيث: h المسافة بين الكاشف والمصدر، R نصف قطر الكاشف (1.5cm)، F معامل التصحيح؛ كون المصدر غير نقطي (ويساوي تقريباً 0.95).

يبين الشكل (9) أن زيادة مدة الحك في الكواشف (مع اختلاف المسافة الفاصلة بين الكاشف والمصدر) يؤدي لزيادة تركيز الآثار الظاهرة على سطح الكاشف.

وهذا لا يعني اختلاف في عدد جسيمات ألفا الواصلة؛ وإنما ينتج عن ظهور آثار أضعف داخل الكاشف، لم تكن ظاهرة من قبل، كون عملية الحك تزيد المساحات بمقدار أكبر كلما زادت مدة الحك، مع ملاحظة أنه لا يمكن الاستمرار في عملية الحك لأزمنة كبيرة؛ وذلك بسبب تأثر سمك الكاشف، وتداخل الآثار الظاهرة نتيجة توسعها، وتزايد قطرها، وعندها سيصعب التمييز بينها.

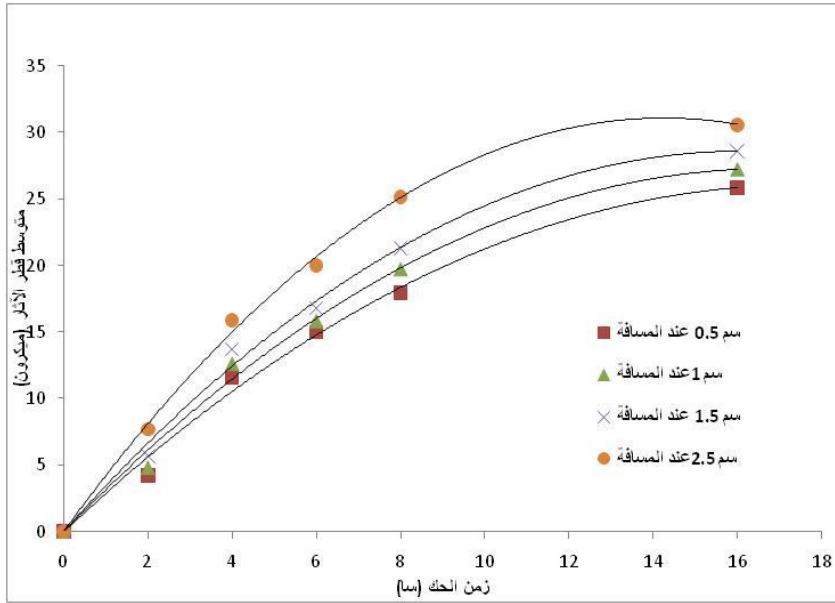


الشكل (9) كثافة الأثر بدلالة زمن الحك.

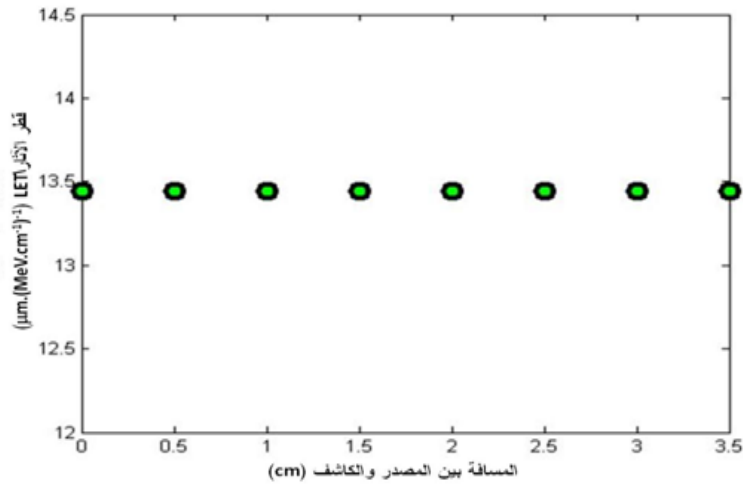
يمكننا التأكيد أنّ الفعل الأكبر الذي يزداد بزيادة مدّة الحكّ هو قطر الأثر على الكاشف، حيث يوضّح الشكل (10) كيفية تزايد قطر الأثر بزيادة زمن الحك. تعود زيادة قطر الأثر إلى تآكل السطح الداخلي للمخروط الذي يشكّله الأثر عند تفاعل محلول الحكّ مع الأثر الكامن الذي يتركه جسيم ألفا على طول مساره من السطح نحو الداخل، ومع مرور الزمن يقوم محلول الحكّ بتوسيع هذا المخروط؛ وبالتالي زيادة مساحة الأثر المظهر.

لا يختلف سلوك جسيم ألفا عند تفاعله مع كواشف الأثر النووي عن تفاعله مع أي مادة أخرى من حيث إيداع الطاقة، حيث يوضح الشكل (11) مقارنة نسبة الطاقة المودعة محسوبة نظرياً باستعمال علاقة بيت إلى قطر الأثر المقاس عملياً مع البعد بين المصدر والكاشف.

هنا نلاحظ أنّ المنحني هو مستقيم ميله معدوم؛ مما يدل على ثبات هذه النسبة مع تغير المسافة. وهذا يعني أنّ قطر الأثر يرتبط بشكل وثيق مع قيمة انتقال الطاقة الخطي المحسوبة نظرياً والتي على أساسها تم رسم قمة براغ. هذا ما يؤكد تحقق منحني براغ تماماً عند تفاعل جسيم ألفا مع الكاشف.



الشكل (10) يوضح العلاقة بين تغير زمن الحك ومتوسط قطر الآثار الظاهرة.



الشكل (11) نسبة قطر الآثار إلى الـ LET بدلالة المسافة بين المصدر والكاشف



## 9. الخاتمة والتوصيات:

جرى في هذا البحث دراسة منحنى براغ باستخدام الكواشف البلاستيكية CR-39. حيث تمت دراسة خصائص آثار جسيمات ألفا المسجلة على هذه الكواشف، وذلك بعد أن جرى تعريضها لمنبع ألفا ومن ثم معالجة هذه الكواشف كيميائياً؛ بغية إظهار هذه الآثار. وقد تبين بالنتيجة أن العلاقة بين قطر الأثر وبعد الكاشف عن المصدر (طاقة ألفا) تتوافق إلى حد ما مع شكل منحنى براغ، حيث إن قطر الأثر كان صغيراً عندما كان الكاشف قريباً جداً من المصدر، ومن ثم يبدأ قطر الأثر بالازدياد تدريجياً مع الابتعاد عن المصدر حتى يبلغ قيمة عظمى توافق قمة براغ، ثم يتناقص قطر الأثر مع استمرار البعد عن المصدر، بعيداً عن الاختلاف في قطر الأثر؛ تبعاً لزمن الحك بين المجموعات الست المختلفة أساساً في زمن الحك. يظهر من خلال هذه الدراسة إمكانية استخدام الكواشف البلاستيكية CR-39 كمطيافية لجسيمات ألفا. كما تبين أن مردود الكشف؛ أي استجابة كواشف الـ CR-39 من أجل طاقات مختلفة لجسيمات ألفا ثابت.

**10. المراجع:**

1. Shweikani, R., Raja, G., 2005. Design, construct and test a calibration radon chamber. Radiation Measurements 40, 316–319.
2. Durrani, S.A., 1993. Radon as a health hazard at home: what are the facts? Nuclear Tracks Radiation Measurement. 22, 303–317.
3. Durrani, S.A., Ilic, R., 1997. Radon Measurements by Etched Tracks Detectors. World Scientific Publishing Co. Pt. Ltd.
4. D. AL-Azmi, T. AL-Abed, M.S. ALnasari, E.E. Borham, Z. Chekir, M.S. Khalifa, R. Shweikani, 2012, Coordinated indoor radon surveys in some Arab countries, Radioprotection, Vol. 47, pages 205 - 217.